Pour l'examen, réviser uniquement les page 9 à 18

Partie III : Physique des radiations

للإمتحان، أدرسو فقط الصفحات من 9 الى 18

Chapitre I : Interaction Rayonnement Matière

I.1. Introduction :

Depuis sa création, avant des milliards d'années, l'univers est composé de deux objets : le rayonnement et la matière.

La matière s'est créée par condensation du rayonnement durant le cycle du refroidissement de l'univers après la grande explosion (big bang).

L'interprétation des deux constituants de l'univers était l'objet des recherches des physiciens à partir du 16ème siècle.

Si la matière a été tôt expliquée comme un assemblages de particules liées par un système de forces électriques, magnétiques et nucléaires, le rayonnement, quant à lui a divisé les physiciens entre deux écoles : école ondulatoire soutenant la thèse de Maxwell prédisant que le rayonnement est une propagation d'ondes électromagnétiques dans le vide et l'école corpusculaire ou quantique soutenant la thèse de Max Planck prédisant que le rayonnement est une propagation de particules ou grains sans masse portant des énergies appelés photons.

Dans cette partie de cours, on s'intéressera à cet aspect quantique du rayonnement.

I.2. Pourquoi l'aspect corpusculaire ?:

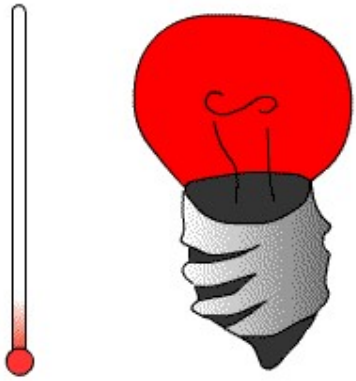
Le rayonnement a été considéré ondulatoire jusqu'à la découverte de plusiseurs phénomènes physiques mettant en échec cette théorie. Il s'agit du rayonnement du corps noir, de l'effet photoélectrique, de l'effet Compton. La tentation des physiciens à interpréter ces phénomènes dans le cadre de la loi classique de Maxwel subit un échec d'où la nécessité d'introduire d'autres paramètres qui ont conduit Max Planck à introduire l'idée de la quantification de l'énergie et puis du rayonnement.

I.3. Le rayonnement thermique ou rayonnement du corps noir :

Un corps chauffé émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Une des particularités de ce rayonnement dit "thermique" est que lorsque le corps se chauffe plus, l'émission devient plus élevée.

Au niveau microscopique, ce phénomène ne peut s'expliquer en physique classique (théorie ondulatoire). Cependant, on retiendra comme image que plus la température du corps est élevée, plus l'agitation thermique (mouvement des atomes dans le corps) responsable de de

l'énergie émise est grande. Le rayonnement thermique se déplace vers les courtes longueurs d'ondes quand la température augmente.



Ainsi le filament de tungstène utilisé dans les lampes à incandescence a une couleur caractéristique de sa température. A faible température, il est rouge-orangé, puis jaune puis blanc. Le pic du spectre d'émission se déplace de la limite entre l'infra-rouge et le visible (rouge) vers le milieu du visible (blanc).

Il faut finalement distinguer la nature des récepteurs de ce rayonnement thermique : certains le réfléchissent d'autres l'absorbent et la transforment en énergie interne pour rayonner à leur tour.

I.4. Caractéristiques du rayonnement thermique :

Nous allons étudier les différents comportements de la matière vis à vis du rayonnement thermique. Nous rappelons que le rayonnement thermique est un rayonnement électromagnétique; on retrouve donc le vocabulaire des ondes.

- **Émission**

Un corps porté à une certaine température convertit son énergie interne (énergie microscopique) en rayonnement thermique. Une unité de surface d'un corps émet durant une unité de temps une quantité d'énergie appelée flux d'émission. On le note F_{emi}.

- **Absorption**

Il s'agit de l'opération inverse. Quand une surface reçoit un flux d'énergie, la fraction transformée en énergie interne est appelée flux absorbé (noté F_{abs})

- **Réflexion et diffusion**

Au lieu d'être absorbé, le rayonnement incident sur une paroi peut être directement renvoyé par la paroi. Dans ces conditions on distingue 2 cas.

- Le renvoi obéit aux lois de l'optique géométrique (un angle d'incidence, un angle de réflexion). Il s'agit alors de réflexion.

- Le renvoi se fait dans toutes les directions (même si l'on a une seule direction incidente). On parle alors de diffusion.

On note que l'onde diffusée ou émise a la même fréquence que l'onde incidente. La somme de ces deux flux est notée F_{ref}.

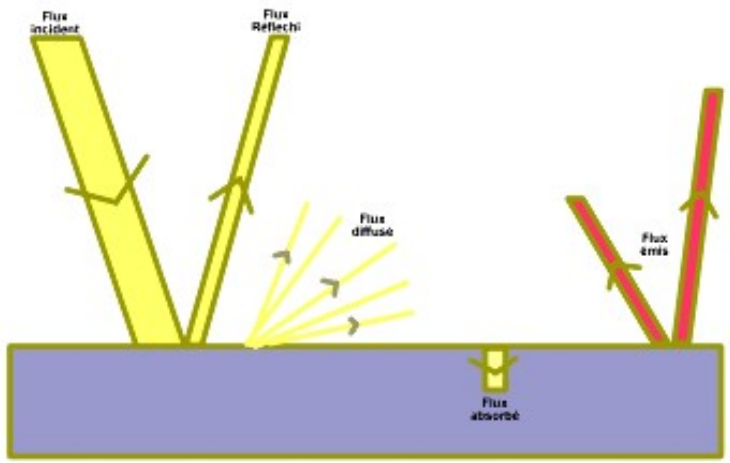
- **Transparence et opacité**

Un milieu peut transmettre intégralement l'onde incidente, il est alors appelé milieu transparent. Le vide est un exemple de milieu transparent.

En première approximation, le verre est aussi un milieu transparent pour des longueurs d'ondes dans le domaine du visible.

Inversement, un corps ne transmettant aucune partie du rayonnement incident est dit corps opaque.

Figure . <u>Les différents flux au niveau de la surface d'un corps opaque</u>



On remarque que le flux émis n'est pas forcément à la même longueur d'onde que le flux incident.

Rappel des notations du cours pour les flux

$F_{réf} = Flux_{réfléchi} + Flux_{diffusé}$; $F_{abs} = Flux_{absorbé}$; $F_{émi} = Flux_{émis}$; $F_i = Flux_{réfléchi} + Flux_{absorbé}$; $F_p = Flux_{réfléchi} + Flux_{émis}$

Relations entre les flux lumineux, notion de rayonnement d'équilibre

- **Flux incident**

Le flux incident F_i est défini comme la puissance surfacique du rayonnement incident en un point considéré de la surface du corps étudié (<u>cf. figure précédente</u>).

Le flux incident est soit réfléchi-diffusé, soit absorbé. On a donc la relation suivante :

$$F_i = F_{ref} + F_{abs}$$

- **Flux partant**

Le flux surfacique partant du corps est la somme du flux émis et du flux réfléchi. On a donc la relation suivante :

$$F_p = F_{ref} + F_{emi}$$

- **Équilibre radiatif**

On dit qu'un corps opaque est en équilibre radiatif avec le rayonnement qui l'entoure, s'il n'emmagasine pas d'énergie ou n'en perd pas.

Dans ces conditions, le flux incident doit être égal au flux partant. On a donc :

$$F_p = F_i \qquad et \qquad F_{emi} = F_{abs}$$

I.5. Définition du *« corps noir »*, lois de Planck, de Wien et de Stephan

- **Le corps noir**

Le corps noir est par définition un corps absorbant intégralement les radiations qu'il reçoit.

Dans ces conditions, le flux réfléchi est nul et le flux partant est seulement constitué du flux émis. On a donc :

$$F_{ref} = O \qquad et \qquad F_p = F_{emi}$$

- **Densité Spectrale d'un corps noir**

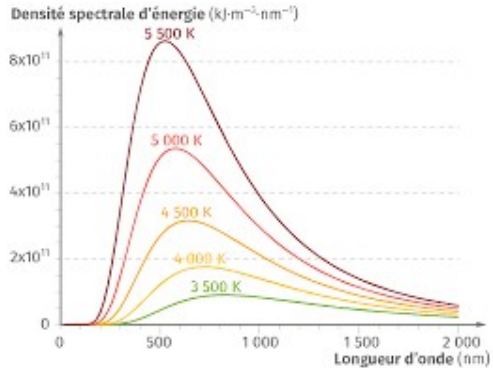
On définit la densité volumique **U** du rayonnement par U=dE/dV où E est l'énergie rayonnée et v est le volume du corps chauffé.

Par ailleurs, on peut définir pour chaque longueur d'onde λ du rayonnement, la densité spectrale de rayonnement U_λ=dU/d λ ou par fréquence U_υ=dU/dυ. Où υ est la fréquence du rayonnement (υ=c/λ).

U_υ est l'énergie rayonnée par une unité de volume du corps noir sous forme de rayonnement de fréquence υ.

On peut définir aussi la radiance R par R=dE/dS. R est l'énergie rayonnée par une unité de surface d'un corps noir. La radiance spectrale R_υ=dR/dυ. R_υ est l'énergie rayonnée par une unité de surface d'un corps noir sous forme de rayonnement de fréquence υ.

Les mesures empiriques ou expérimentales des densités spectrales ont donné une courbe sous forme de pics en mouvement suivant le déplacement de la température :



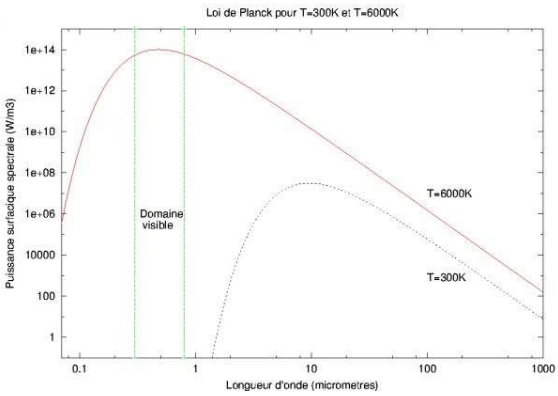
Cette courbe montre que la densité spectrale augmente de 0 à un maximum pour une longueur d'onde λ_{max} puis elle décroit rapidement vers les grandes longueurs d'ondes. Une décroissance injustifiée puisque la logique est que la densité d'énergie doit être croissante lorsque les longueurs sont petites. Le pic à λ_{max} est appelé la catastrophe ultraviolette vue que λ_{max} à l'ultraviolet.
Le physicien allemand Wien a tenté en 1893 de donner une loi théorique à cette courbe expérimentale en stipulant :

$$U_U=\alpha\, U^3 e^{-\beta U/T} \text{ où } \alpha \text{ et } \beta \text{ sont des constantes.}$$

Cette loi est décroissante en fonction de U. Elle décrit bien la courbe expérimentale à hautes longueurs d'ondes ou à basses fréquences.

Wien a établi aussi directement de la formule de Planck, une loi appelée loi déplacement de Wien. Pour une température donnée, elle donne la valeur de la longueur d'onde λ_m où le flux est maximal. À l'aide de la figure montrant les courbes de Planck pour les 2 températures, on peut trouver graphiquement que :

$$\lambda_m T = C = 3000 \mu m.K$$



- Pour T = 6 000 K, λ_m = O,6 micromètre (µm), soit le milieu du spectre visible.

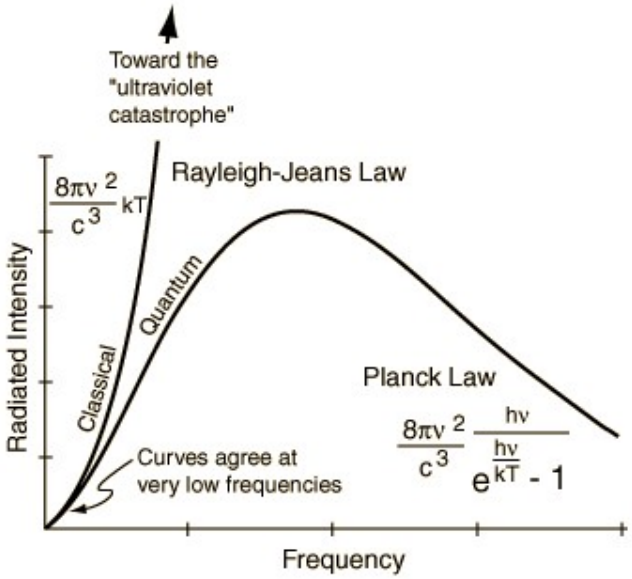
- Pour T = 300 K, λ_m = 10 µm, situé dans infra-Rouge.

On vérifiera ces valeurs en faisant une simple division !!!!

Par ailleurs, Rayleigh et Jeans ont proposé une autre loi décrivant la courbe expérimentale de U_U. Il stipule que la densité spectrale est donnée par :

$$U_U=8\pi\, U^2 K_B T/c^3$$

Cette courbe est croissante en fonction de U. Ce résultat coïncide bien avec la courbe expérimentale mais à basses fréquences.



- **Loi de Planck : Théorie des quanta**

Pour résoudre le problème, Max Planck a dû faire une hypothèse très étrange pour son époque. Il remarqua que pour reproduire la courbe expérimentale, il doit forcer l'énergie du rayonnement à être quantifiée, c'est-à-dire que l'énergie du rayonnement doit s'écrire sous forme E=n.hU. n étant un nombre entier.

Cette écriture stipule que l'énergie est constitué désormais d'un ensemble de grains élémentaires appelés quanta (pluriel de quantum) portant chacun une certaine énergie indivisible ξ.

Avec cette interprétation, la courbe de U_U peut décroitre même si U puisqu'on a le nombre n qui peut diminuer d'une manière brusque.

A l'occasion, Planck a donné la formule théorique de la courbe expérimentale :

$$U_U= U^3[(8\pi h/c^3)\,.\,1/e^{hU/kT}-1].$$

Résultat1 : L'interprétation de la courbe expérimentale de la densité spectrale du corps noir a exigé l'introduction de la notion de quantification de l'énergie.

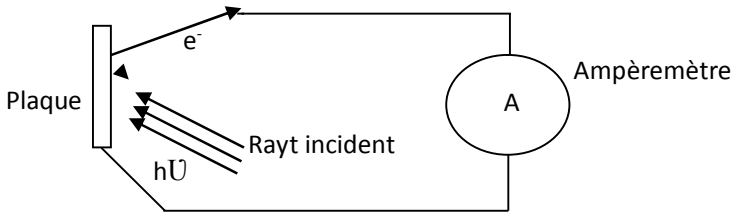
I.6. Effet photoélectrique

Le concept du quantum d'énergie est resté dans l'ombre pendant près de 5 ans jusqu'à ce qu'Albert Einstein se préoccupe du problème.

L'expérience de l'effet photoélectrique consiste à envoyer un rayonnement de fréquence U vers une plaque métallique (photocathode) reliée à un ampèremètre qui mesure les courants électriques passant dans le circuit.

Moins d'une certaine fréquence Us (fréquence seuil) du rayonnement incident aucun courant n'est signalé par l'ampèremètre. Losque U> Us, les électrons s'éjectent de la plaque est se déplacent dans le circuit.

En 1905 Einstein publia un article de recherche où il interprète l'effet photoélectrique par un échange photon-électron entre le rayonnement et la matière. Le rayonnement incident donne un photon d'énergie ξ à la matière qui éjecte un électron à l'extérieur récupéré par le circuit.



L'expérience a montré que l'effet photoélectrique est lié directement à U.

Si U> Us, il y a passage de courant donc il y a effet photoélectrique.

Si U< Us, aucun passage de courant donc pas d'effet photoélectrique.

Pour des fréquences inférieures à Us, même si on accumule le rayonnement sur la plaque pour longtemps, aucun courant n'est signalé. On déduit que l'extraction de l'électron de la plaque est due directement à la fréquence U du rayonnement incident ce n'est plus à l'énergie globale du faisceau.

Loi d'Einstein

Le photon incident d'énergie h U sert à extraire un électron lié à l'atome par une énergie de liaison E_l et à lui donner une énergie cinétique E_C pour se déplacer dans le circuit.

$\xi = hU = E_l + E_C = hU_s + 1/2\ m_e v^2$ (loi d'Einstein pour l'effet électrique), m et v masse et vitesse de l'électron.

Energie incidente = énergie de liaison + énergie cinétique

Pour qu'il y ait effet photoélectrique il faut que $E_C > 0$ donc $U > U_s$ avec ($hU_s = E_l$).

U_s est la fréquence seuil qui correspond à l'extraction de l'électron avec une énergie cinétique nulle.

Résultat 2 : pour comprendre l'effet photoélectrique, Einstein a dû recourir à l'idée de quantification de Planck. Alors en stipulant que le rayonnement est composé de grains appelés photons portant une énergie ξ lié à la fréquence du rayonnement par $\xi=hU$, il a pu expliquer le phénomène de l'effet photoélectrique.

I.7. Effet Compton

Lorsqu'on envoie un photon d'énergie hU vers un électron faiblement lié à l'atome, on remarque l'éjection d'un électron et l'émission d'un photon d'énergie plus faible hU'. L'explication de ce phénomène ne peut se faire que si on considère que le rayonnement incident est constitué de photons qui heurtent un électron au repos. On traite le problème comme un choc élastique (accident) entre un photon de vitesse v et un électron au repos (V=0).

Après le choc, l'électron aura une vitesse v' et le photon une vitesse v'_{ph}.

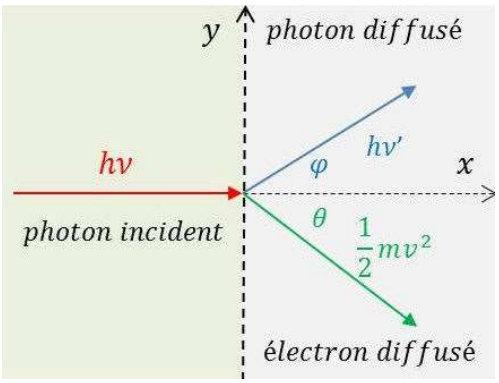
En utilisant les principes de conservation de la quantité de mouvement avant et après le choc:

$P_{ph}+P_{é}=P'_{ph}+P'_{é}$ (relation vectorielle) avec P=mv.

et la conservation d'énergie

$E_{ph}+E_{é}=E'_{ph}+E'_{é}$ (relation scalaire)

On aura la valeur de U' (fréquence du photon éjecté après le choc).



Résultat 3 : la concordance entre la valeur trouvée par calcul de U' et celle mesurée dans l'expérience montre que le modèle supposé au début par Compton (rayonnement constitué de photons) est juste ; ce qui prouve encore une fois que le rayonnement est quantifié.

Commencez ICI

Chapitre II : LES RAYONNEMENTS IONISANTS

II.1. INTRODUCTION

Les rayonnements ionisants sont partout dans l'univers. Ils viennent de l'espace sous forme de rayons cosmiques. Ils sont émis dans l'atmosphère par le radon et ses descendants radioactifs. Les radio-isotopes naturels pénètrent tous les tissus vivants et y restent. Aucun être vivant ne peut y échapper. En fait, l'évolution de toutes les espèces de la planète s'est faite grâce à la présence de rayonnements ionisants. Même si les effets biologiques de petites doses de rayonnement ne sont pas immédiatement apparents chez des humains exposés, il n'y a pas de doute qu'à partir d'une certaine intensité les rayonnements ionisants sont nuisibles. Leurs effets sont bien connus, tant en nature qu'en gravité.

S'il est vrai que les rayonnements ionisants peuvent être dommageables, ils ont, par contre, de multiples applications utiles. L'uranium radioactif produit de l'électricité dans les centrales nucléaires de nombreux pays. En médecine, les rayons X permettent de prendre des radiographies qui servent à diagnostiquer des maladies et des lésions internes. Les spécialistes de la médecine nucléaire se servent de produits radioactifs comme traceurs pour former des images détaillées de structures internes et pour étudier le métabolisme. Il existe des produits radiopharmaceutiques permettant de traiter des maladies telles que l'hyperthyroïdie et le cancer. Les radiothérapeutes ont recours aux rayons gamma, aux faisceaux de pions et d'électrons, aux neutrons et à d'autres types de rayonnement pour traiter les tumeurs cancéreuses. Les ingénieurs utilisent des éléments radioactifs pour faire des diagraphies des puits de pétrole et se servent de nucléodensimètres pour mesurer la densité des sols. Les radiographes industriels emploient les rayons X en contrôle de la qualité pour observer la structure interne des produits manufacturés. Dans les immeubles et les avions, les panneaux indiquant les sorties et les issues de secours portent des inscriptions au tritium radioactif qui les rend visibles dans l'obscurité en cas de panne de courant. D'innombrables logements et locaux commerciaux sont protégés par des détecteurs de fumée fonctionnant à l'américium radioactif.

II.2. Les types de rayonnements ionisants

Les rayonnements ionisants consistent en particules, y compris des photons, qui arrachent des électrons à des atomes et des molécules. Toutefois, certains rayonnements d'énergie relativement faible, comme les rayons ultraviolets, peuvent être ionisants dans des conditions particulières. Pour les distinguer des rayonnements qui provoquent toujours l'ionisation, on définit un seuil arbitraire d'énergie, en général 10 kiloélectronvolts (keV), à partir duquel les rayonnements sont dits ionisants.

Les rayonnements directement ionisants consistent en particules chargées: électrons énergétiques (parfois appelés négatons), positons, protons, particules alpha, mésons chargés, muons et ions lourds (atomes ionisés). Les rayonnements de ce type agissent sur la matière en vertu de la loi de Coulomb, leur charge attirant ou repoussant les électrons qui gravitent autour des atomes et des molécules.

Les rayonnements indirectement ionisants consistent en particules neutres; les plus courants étant les photons de plus de 10 keV (rayons X et gamma) et tous les neutrons.

On peut classifier aussi les rayonnements ionisants selon leur nature en deux types : Rayonnement particulaire et rayonnement électromagnétique.

2.1. Le Rayonnement particulaire

Sont les particules alpha, Bêta, gamma et les neutrons

1.1. Les particules alpha

Une particule alpha est un ensemble étroitement lié formé de deux protons et de deux neutrons. Elle est identique à un noyau d'hélium 4 (^{4}He). De fait, après avoir perdu la plus grande partie de son énergie cinétique, cette particule capturera en définitive deux électrons pour devenir un atome d'hélium.

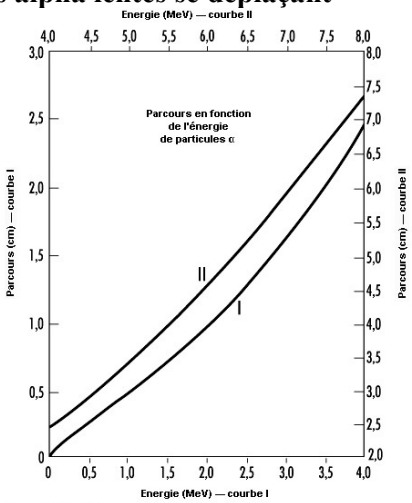
Les radionucléides émetteurs alpha ont en général des noyaux relativement lourds. Presque tous ont un numéro atomique supérieur ou égal à celui du plomb (^{82}Pb). Lorsqu'un noyau se désintègre en émettant une particule alpha, tant son numéro atomique (nombre de protons) que son nombre de neutrons baissent de deux unités, tandis que son nombre de masse diminue de quatre. Par exemple, la désintégration alpha de l'uranium 238 (^{238}U), qui produit du thorium 234 (^{234}Th), est représentée par la formule:

$$^{238}U \rightarrow \rightarrow \rightarrow {}^{234}Th + \alpha$$

L'indice de gauche en haut est le nombre de masse atomique (nombre de protons + nombre de neutrons), l'indice de gauche en bas étant le numéro atomique (nombre de protons) et l'indice de droite, le nombre de neutrons.

Les émetteurs alpha les plus courants émettent des particules dont l'énergie cinétique se situe entre 4 et 5,5 MeV et qui, dans l'air, ont un parcours ne dépassant pas 5 cm (voir figure). Pour pénétrer l'épiderme (couche protectrice de la peau, épaisse de 0,07 mm), une particule alpha doit posséder une énergie minimale de 7,5 MeV. Les émetteurs alpha ne présentent pas en général de risques par irradiation externe; ils ne constituent un danger que s'ils sont absorbés par l'organisme. Comme leur parcours est relativement court, leur transfert linéique d'énergie (TLE) est élevé, de même que leur facteur de pondération w_R, dont la valeur caractéristique est de 20.

Figure : Parcours, en fonction de leur énergie, de particules alpha lentes se déplaçant dans l'air à 15 °C sous une pression de 760 mm Hg



1.2. Les particules bêta

Une particule bêta consiste en un électron ou un positon très énergétique (le positon est l'antiparticule de l'électron. Il a la même masse et la plupart des autres propriétés de l'électron, mais sa charge, exactement égale à celle de l'électron, est cependant de polarité opposée, c'est-à-dire positive). Les radionucléides émetteurs bêta peuvent avoir un numéro atomique faible ou élevé.

Les radionucléides ayant un excédent de protons par rapport à des nucléides stables ayant à peu près le même nombre de masse peuvent se désintégrer si un proton du noyau se transforme en neutron. Lorsque cela se produit, le noyau émet un positon ainsi qu'une particule extrêmement légère et à très faible interaction appelée neutrino (le neutrino et son antiparticule ne présentent pas d'intérêt dans le domaine de la radioprotection). Une fois qu'il a perdu la plus grande partie de son énergie cinétique, le positon finit par heurter un électron, provoquant l'annihilation des deux particules. Le rayonnement d'annihilation consiste presque toujours en deux photons de 0,511 MeV émis dans des directions opposées à 180 degrés. La formule suivante illustre une désintégration caractéristique par émission de positons:

$$^{22}Na_{11} \rightarrow\rightarrow {}^{22}Ne_{11} + \beta^{+} + \gamma$$

le positon étant représenté par β^{+} et le neutrino par ν. Il convient de noter que le nucléide résultant a le même nombre de masse atomique que le nucléide père, un numéro atomique (nombre de protons) inférieur d'une unité et un nombre de neutrons supérieur d'une unité.

La capture d'électrons est un phénomène concurrent. Dans la désintégration par capture d'électrons, le noyau absorbe un électron orbital et émet un neutrino.

La capture d'électrons est toujours possible quand le noyau résultant a une énergie totale inférieure à celle du noyau initial. Par contre, la désintégration par émission de positons ne peut se

produire que si l'énergie totale de l'*atome* initial dépasse celle de l'*atome* résultant de plus de 1,02 MeV (deux fois l'énergie correspondant à la masse au repos du positon).

Comme les deux formes précédentes, la désintégration par émission de négaton (β^-) se produit dans le cas de noyaux ayant un excédent de neutrons par rapport à des noyaux stables d'environ le même nombre de masse. Dans ce cas, le noyau émet un négaton (électron énergétique) et un antineutrino.

le négaton étant représenté par β^- et l'antineutrino par . Dans ce cas, le noyau résultant acquiert un neutron en perdant un proton, une fois de plus sans changer de nombre de masse.

Comme la désintégration alpha est une réaction à deux particules, les particules alpha émises ont une énergie cinétique de valeur déterminée. Par contre, la radioactivité bêta faisant intervenir trois particules, l'énergie des particules bêta varie selon une distribution continue. L'énergie maximale de cette distribution dépend du radionucléide en cause, l'énergie bêta moyenne correspondant approximativement à un tiers de l'énergie maximale.

Dans l'air, les particules bêta ont un parcours d'environ 3,65 m par MeV d'énergie cinétique. Elles doivent avoir une énergie minimale de 70 keV pour pénétrer l'épiderme. Les particules bêta ont un faible TLE.

1.3. Les neutrons

En général, l'émission de neutrons n'est pas le résultat direct d'une désintégration radioactive naturelle. Les neutrons sont plutôt le produit de réactions nucléaires. Les réacteurs nucléaires produisent beaucoup de neutrons, mais on en obtient également dans les accélérateurs de particules et en utilisant des sources spéciales de neutrons appelées sources (α, n).

Les réacteurs nucléaires produisent des neutrons par fission des noyaux d'uranium (U) du combustible. En fait, la production des neutrons est essentielle au maintien de la réaction de fission.

Les accélérateurs de particules produisent des neutrons en accélérant des particules chargées, comme des protons ou des électrons, puis en les utilisant, une fois qu'elles ont acquis une haute énergie, pour bombarder les noyaux stables d'une cible. Les neutrons ne sont que l'un des types de particules résultant de telles réactions nucléaires. Ainsi, en accélérant des ions de deutérium pour bombarder une cible de béryllium dans un cyclotron, on obtient des neutrons.

2.2. Le rayonnement électromagnétique

2.1. Le rayonnement gamma

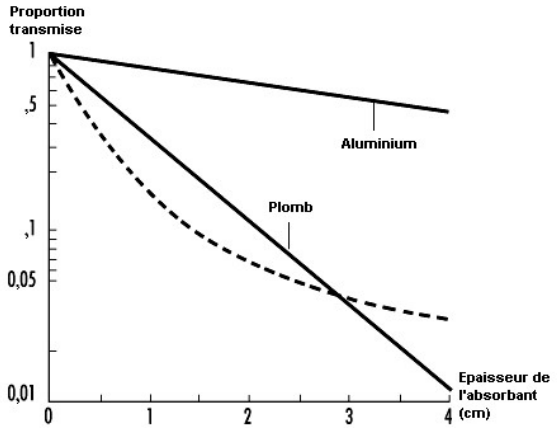
Le rayonnement gamma est une onde électromagnétique émise par un noyau, siège d'une transition d'un niveau d'énergie supérieur à un niveau d'énergie inférieur. La transition ne modifie pas le nombre de protons et de neutrons du noyau. Ce dernier peut se retrouver à un niveau d'énergie supérieur par suite d'une désintégration alpha ou bêta antérieure. Autrement dit, les rayons gamma sont souvent émis immédiatement après des désintégrations alpha ou bêta. Le rayonnement gamma peut également résulter de la capture de neutrons ou de la diffusion inélastique de particules subatomiques par un noyau. C'est dans le rayonnement cosmique que l'on a pu déceler les rayons gamma les plus énergétiques.

Tandis que les particules alpha et bêta ont un parcours défini dans la matière, le rayonnement gamma subit une atténuation exponentielle en traversant la matière (compte non tenu de l'accumulation due à la diffusion). Si on peut négliger cette dernière, l'atténuation du rayonnement gamma est donnée par la formule d'attenuation des rayons X.

$I_x = I_0 e^{-\mu x}$

I_x étant l'intensité du rayonnement gamma en fonction de la distance x franchie dans la matière et μ le coefficient d'atténuation massique. Ce coefficient dépend de l'énergie du rayonnement gamma et de la matière avec laquelle il interagit. Des valeurs caractéristiques de ces coefficients figurent dans beaucoup des ouvrages cités dans les références bibliographiques. La figure 2 montre l'absorption du rayonnement gamma dans la matière dans de bonnes conditions de géométrie (permettant de négliger l'accumulation).

Figure : Atténuation de rayons gamma de 667 keV dans l'aluminium et le plomb dans de bonnes conditions géométriques (la ligne pointillée représente l'atténuation d'un faisceau de photons polychromatique)



L'accumulation se produit lorsqu'un large faisceau de rayons gamma interagit avec la matière. L'intensité du rayonnement mesurée à certains points est supérieure à la valeur attendue d'une «bonne géométrie» (faisceau étroit) parce que des rayons diffusés des côtés du faisceau direct atteignent l'appareil de mesure. Le degré d'accumulation dépend de la géométrie du faisceau, de la matière traversée et de l'énergie des rayons gamma.

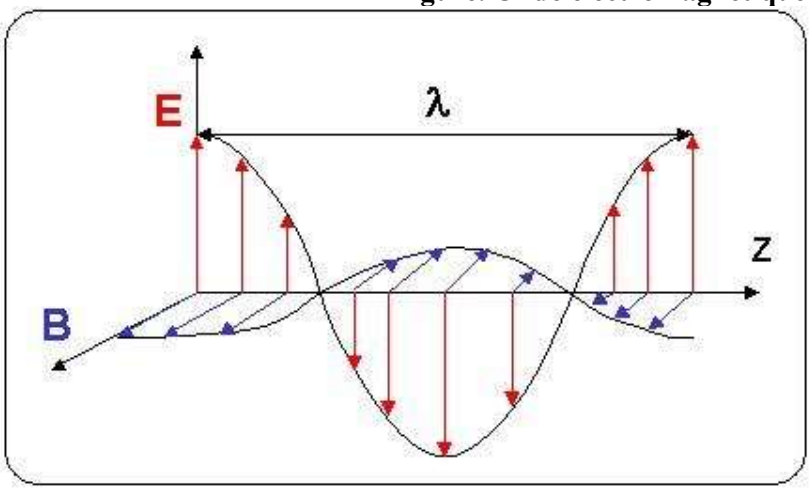
La conversion interne entre en concurrence avec l'émission gamma lorsqu'un noyau passe d'un certain niveau d'énergie à un niveau plus bas. En cas de conversion interne, l'émission par le noyau d'un rayonnement gamma est remplacée par l'éjection d'un électron des orbites internes. Cet électron est directement ionisant. Tandis que les électrons des orbites externes passent à des niveaux d'énergie inférieurs pour remplir le vide laissé par l'électron éjecté, l'atome émet des rayons X. La probabilité de la conversion interne par rapport à celle de l'émission d'un rayonnement gamma augmente avec le numéro atomique.

2.2. Les rayons X

Les rayons X sont une forme de rayonnement électromagnétique, au même titre que la lumière visible, l'ultra-violet, l'infra-rouge, les micro-ondes, les ondes radio ou les rayons gamma.

Une onde électromagnétique est due à un champ électrique et un champ magnétique perpendiculaires oscillants en phase (figure 1). Elle se propage dans le vide à la vitesse de la lumière (c = 299792458 m/s). Dans le cas d'une onde sinusoïdale ou monochromatique, elle a une fréquence ν définie et une période T = 1/ν. La longueur d'onde λ est la distance parcourue par l'onde en une période, soit λ = c T = c/ν.

Figure. Onde électromagnétique



Structure à un instant donné des champs électriques et magnétiques, E et B, de l'onde se propageant dans la direction z.

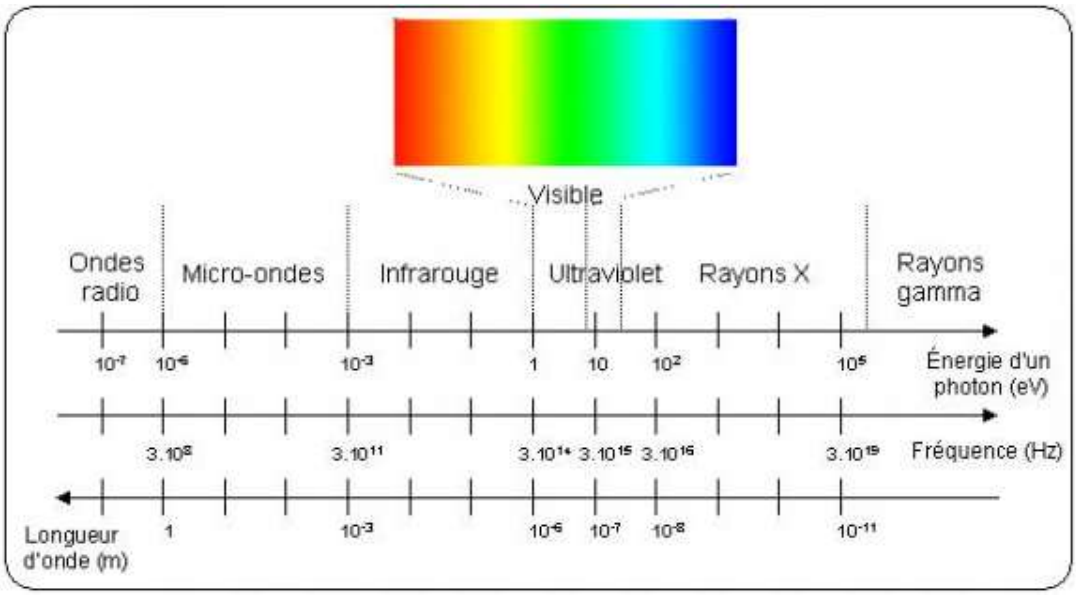
Une onde électromagnétique réelle est généralement constituée d'une superposition d'ondes de fréquences différentes. La répartition quantitative de la puissance propagée selon la fréquence est appelée le « spectre » de l'onde.

Le modèle corpusculaire du rayonnement électromagnétique est mieux adapté aux rayonnements de hautes fréquences : on considère qu'un faisceau est constitué de photons, des particules sans masse qui se déplacent à la vitesse de la lumière. Chaque photon transporte une quantité d'énergie E proportionnelle à la fréquence de l'onde E=hν, où h est la constante de Planck.

Les ondes électromagnétiques sont classées et nommées en fonction de leur domaine de fréquence (figure). Bien que de même nature, les ondes d'un domaine de fréquence à l'autre correspondent à des mécanismes d'émission différents et exigent des techniques différentes de détection.

On appelle rayons X les ondes électromagnétiques dont les fréquences sont comprises entre 10^{16} Hz et 10^{20} Hz. Les longueurs d'ondes sont de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-12} m, et les énergies des photons X sont comprises entre 40 et $4x10^{5}$ eV (1 eV correspond à 1,6x10-19 J, c'est l'énergie d'un photon dans l'infra-rouge). Ces énergies sont de l'ordre de grandeur des énergies de liaison des électrons des couches internes des atomes (de l'ordre du keV). Le domaine des rayons X se situe entre l'ultra-violet et les rayons gamma.

Figure. Spectre électromagnétique



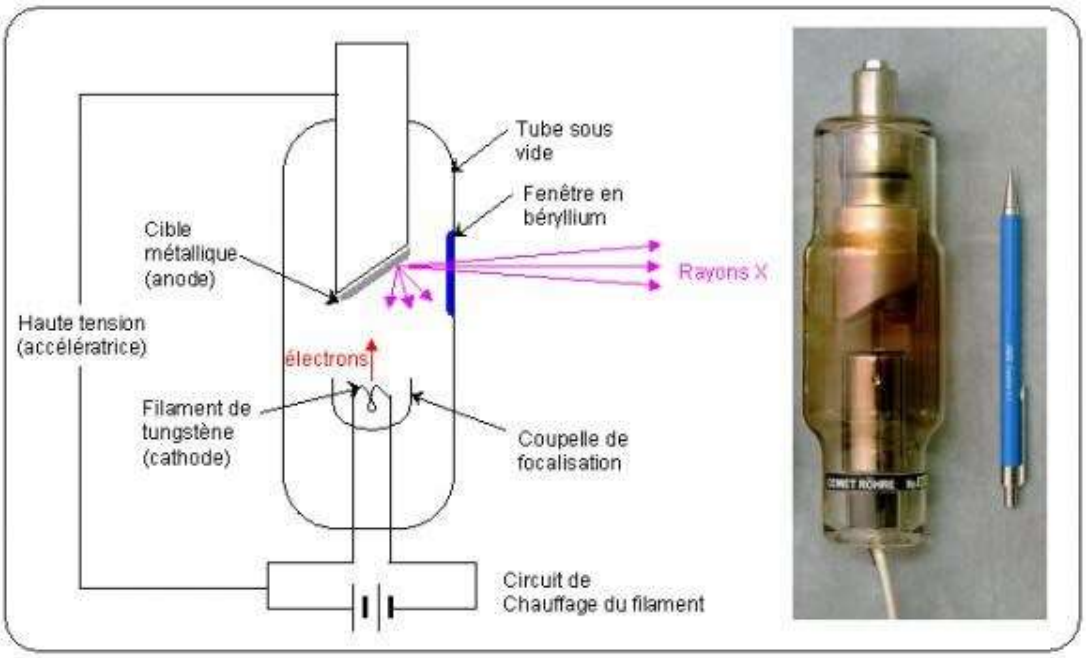
Production de rayons X

Les rayons X sont produits dans des tubes à rayons X également appelés tubes de Coolidge ou tubes à cathode chaude (figure). Le principe est le suivant : des électrons émis par une cathode (un filament, le plus souvent en tungstène, chauffé par le passage d'un courant électrique) sont accélérés par une différence de potentiel élevée (de 10 à 150 kV) en direction d'une cible constituée d'une anode en métal (en tungstène également). Les rayons X sont émis par la cible selon deux mécanismes :

- le freinage des électrons par les atomes de la cible crée un rayonnement continu (rayonnement de freinage ou Bremsstrahlung) dont une partie dans le domaine des rayons X ;
- les électrons accélérés ont une énergie suffisante pour exciter certains des atomes de la cible, en perturbant leurs couches électroniques internes. Ces atomes excités émettent des rayons X en retournant à leur état fondamental.

Une faible portion, 1% environ de l'énergie cinétique cédée par les électrons est rayonnée sous forme de rayons X, les 99 % restants sont convertis en énergie thermique.

Figure . Tube à rayons X



Interaction des rayons X avec la matière

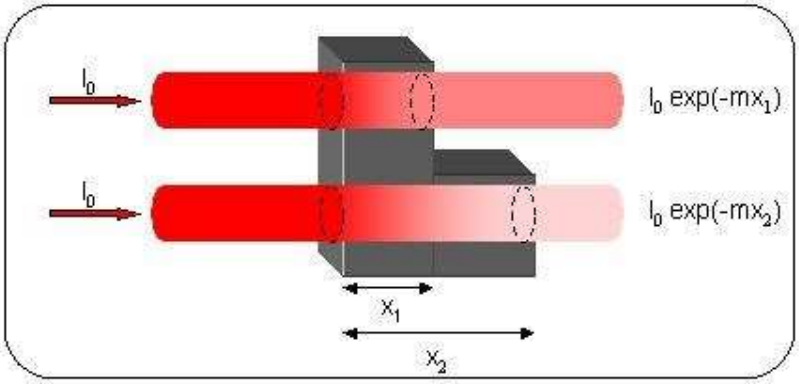
Lors de la propagation à travers un milieu matériel, les rayons X peuvent être déviés par les atomes du milieu (diffusion) ou bien absorbés. C'est ce dernier phénomène qui est mis en jeu dans les applications médicales de la radiographie.

Dans la représentation corpusculaire, un photon entre en collision avec les électrons liés aux atomes du milieu matériel traversé (électrons des couches internes). Si l'énergie E du photon incident est suffisante (supérieure à l'énergie de liaison W de l'électron), il peut arracher un électron du cortège atomique. Cet électron, appelé « photo-électron », est éjecté avec l'énergie cinétique Ecin = E-W. Les photo-électrons transfèrent ensuite leur énergie cinétique au milieu en provoquant des ionisations le long de leurs trajectoires.

L'absorption d'un rayonnement X par un milieu dépend fortement de la nature des atomes : pour une fréquence donnée, on constate que l'absorption est d'autant plus probable que le nombre atomique Z des atomes du matériau traversé est élevé. On constate également qu'un rayonnement de grande énergie (courte longueur d'onde) sera moins absorbé, donc plus pénétrant qu'un rayonnement de plus faible énergie. Les rayons X les plus pénétrants sont appelés rayons « durs » (longueurs d'ondes inférieures au nanomètre).

Considérons un faisceau unidirectionnel de rayons X traversant un écran matériel. L'intensité I(x) du rayonnement décroît exponentiellement en fonction de l'épaisseur x de matière traversée : I(x)= I0 exp(-mx) où m est le coefficient d'atténuation linéaire (figure). Le coefficient d'atténuation m croît en fonction du numéro atomique Z des atomes du matériau, et décroît en fonction de l'énergie des photons X.

Figure. Absorption des rayons X par la matière



L'intensité I du rayonnement décroît exponentiellement en fonction de l'épaisseur x de matière traversée

Application à l'imagerie médicale

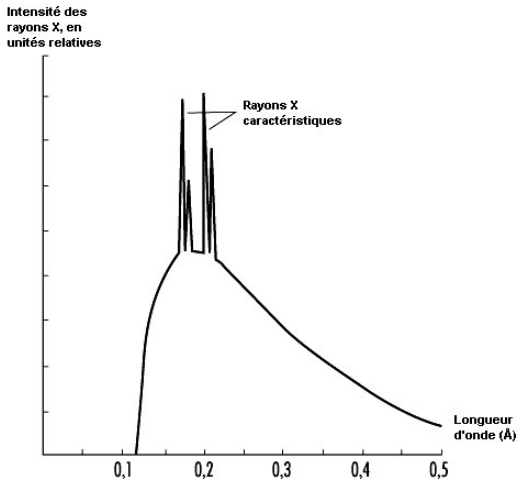
Le faisceau de rayons X produit par un tube à rayons X est émis en direction de la zone du corps humain à examiner, son intensité est « modulée » par l'absorption différentielle des organes traversés. L'image est recueillie en sortie sur un détecteur (plaque photographique par exemple).

Le coefficient d'atténuation m dépend de la composition chimique des tissus traversés. Il est élevé pour l'os, moyen pour les tissus mous et faible pour la graisse. Les os contiennent en effet des sels minéraux (phosphore, calcium, magnésium) qui sont des éléments de numéro atomique plus élevés que les constituants principaux des tissus mous (oxygène, carbone, hydrogène, azote…). Ils absorbent donc plus les rayons X.

La radiologie conventionnelle ne détecte que des contrastes (différences) supérieurs à 4%, ce qui est le cas naturellement pour les os ou les poumons. Lorsque le contraste est insuffisant, on utilise des produits contrastants, par exemple l'iode ou le sulfate de baryum BaSO4 (« bouillie barytée » lors d'un examen du tube digestif).

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques. A ce titre, ils ressemblent aux rayons gamma, la différence entre les deux réside dans l'origine du rayonnement. Les rayons gamma sont issus

Spectre de rayons X illustrant l'émission de rayons X caractéristiques lorsque les électrons comblent les vides de la couche K de la cible en tungstène (la longueur d'onde des rayons X est inversement proportionnelle à leur énergie)



L'énergie des rayons X émis par un tel système forme un spectre continu allant d'environ zéro à l'énergie cinétique maximale que possèdent les électrons avant leur décélération. Souvent, des rayons X à niveaux d'énergie discrets se superposent à ce spectre. Ils sont produits lorsque les électrons incidents ionisent la cible. Tandis que d'autres électrons orbitaux vont remplir les vides laissés par l'ionisation, ils émettent des rayons X à des niveaux discrets d'énergie, de la même façon que dans le processus de conversion interne. Ces rayons X sont dits *caractéristiques* parce qu'ils définissent de façon unique la matière de la cible (anode ou anticathode).

Les rayons X agissent sur la matière de la même façon que les rayons gamma, sauf qu'une simple équation exponentielle ne suffit pas pour décrire correctement l'atténuation de rayons X ayant un spectre d'énergie continu. Toutefois, comme les rayons X de faible énergie s'affaiblissent plus rapidement que les rayons de haute énergie, tandis que le faisceau traverse la matière, l'atténuation après un certain parcours se rapproche d'une fonction exponentielle.

II.3. Les sources de rayonnements ionisants

3.1. Les radionucléides naturels

Les radionucléides naturels sont présents dans la nature parce que leur période radioactive est comparable à l'âge de la Terre. Le tableau énumère les plus importants.

Tableau : Radionucléides naturels

Teneur isotopique (%)	Période (109 ans)	Radio-isotope
99,3	4,47	238U
100	14	232Th
0,72	0,704	235U
0,0117	1,25	40K
27,9	48,9	87Rb
0,0117	1,25	40K
27,9	48,9	87Rb

THE END

.2. Le rayonnement cosmique

Les rayons cosmiques comprennent des particules énergétiques d'origine extraterrestre qui viennent bombarder l'atmosphère (le rayonnement étant essentiellement particulaire et surtout formé de protons). Ils comportent également des particules secondaires — principalement des photons, des neutrons et des muons — engendrées par l'interaction des particules primaires avec les gaz atmosphériques.

A cause de ces interactions, l'atmosphère joue le rôle d'un écran protecteur contre le rayonnement cosmique: plus l'écran est mince, plus la dose efficace est grande. Par conséquent, le débit de dose efficace dû à ce rayonnement augmente avec l'altitude. Ainsi, le débit à 1 800 m d'altitude est le double de celui qui existe au niveau de la mer.

Comme le rayonnement cosmique primaire consiste surtout en particules chargées, il est influencé par le champ magnétique terrestre. Cela revient à dire que les habitants des hautes latitudes reçoivent des doses efficaces plus importantes que les populations vivant près de l'équateur. Les variations dues à cet effet sont de l'ordre de 10%.

Enfin, le débit de dose efficace dû au rayonnement cosmique varie avec les fluctuations de l'activité solaire. En moyenne, la contribution des rayons cosmiques au rayonnement naturel est d'environ 0,3 mSv de dose efficace au corps entier.

3.3. Les radionucléides d'origine cosmique

Le rayonnement cosmique engendre des radionucléides dans l'atmosphère, par interaction avec les gaz atmosphériques. Les plus importants sont le tritium (^{3}H), le béryllium (^{7}Be), le carbone (^{14}C) et le sodium (^{22}Na). Ces radionucléides sont responsables d'une dose efficace annuelle d'environ 0,01 mSv, dont la plus grande partie est due au ^{14}C.

3.4. Les retombées radioactives

De nombreux essais d'armes nucléaires ont été réalisés dans l'atmosphère entre les années quarante et les années soixante, produisant d'importantes quantités de substances radioactives qui se sont dispersées dans l'environnement, partout dans le monde, sous forme de *retombées* . Même si la plupart de ces substances se sont désintégrées depuis, engendrant des isotopes stables, les petites quantités qui restent continueront à agir comme sources d'irradiation pendant très longtemps encore. De plus, les pays qui procèdent encore à l'occasion à des essais nucléaires dans l'atmosphère augmentent ces quantités.

Les principaux constituants des retombées qui contribuent à la dose efficace comprennent actuellement le strontium 90 (^{90}Sr) et le césium 137 (^{137}Cs), qui ont tous deux une période radioactive d'environ trente ans. La dose efficace annuelle moyenne due aux retombées s'élève à environ 0,05 mSv.

3.5. Les radioéléments incorporés

Le dépôt de radionucléides naturels dans l'organisme résulte principalement de leur inhalation dans l'air et de leur ingestion dans les aliments et l'eau. Ils comprennent les radio-isotopes du plomb (Pb), du polonium (Po), du bismuth (Bi), du radium (Ra), du potassium (K), du carbone (C), de l'hydrogène (H), de l'uranium (U) et du thorium (Th). Parmi ces éléments, le potassium^{40}K est le plus important contributeur à la dose. Les radionucléides naturels déposés dans l'organisme ont une contribution d'environ 0,3 mSv à la dose efficace annuelle.

3.6. Le rayonnement artificiel

L'utilisation médicale des rayons X constitue la source d'exposition la plus importante aux rayonnements artificiels. Des millions de tubes à rayons X sont en service dans le monde. L'exposition moyenne provenant de cette source dépend dans une grande mesure de l'accès de la population aux soins médicaux. Dans les pays développés, la dose efficace annuelle provenant de l'utilisation médicale des rayons X et de substances radioactives à des fins diagnostiques et thérapeutiques est en moyenne de l'ordre de 1 mSv.

Par ailleurs, les rayons X sont un sous-produit de la plupart des accélérateurs de particules à haute énergie utilisés par les physiciens, et surtout de ceux qui servent à accélérer des électrons et des positons. Toutefois, les blindages, les précautions prises et l'effectif limité de la population exposée font que cette source d'exposition est sensiblement moins importante que les précédentes.

3.7. Les radionucléides artificiels

Les réactions nucléaires qui se produisent dans les accélérateurs de particules donnent naissance à un grand nombre de radionucléides en quantités diverses. Les particules accélérées comprennent des protons, des deutons (noyaux de^{2}H), des particules alpha, des mésons chargés, des ions lourds, etc. Les cibles peuvent être faites de quasiment tout isotope.

Les accélérateurs de particules sont en pratique la seule source de radio-isotopes émetteurs de positons (les réacteurs nucléaires tendent à produire des radio-isotopes riches en neutrons qui se désintègrent en émettant des électrons négatifs). On s'en sert également de plus en plus pour obtenir des isotopes de courte période utilisés à des fins médicales, notamment en tomographie par émission de positons.

Les matériaux et produits de consommation technologiquement évolués

Des rayons X et matières radioactives sont produits par de très nombreuses opérations techniques modernes, de façon délibérée ou non(fabrication de matériaux de costruction, carburant,….)

II.4. Les unités de mesure de rayonnement

La Commission internationale des unités et mesures radiologiques (International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU)) élabore des définitions officielles acceptées à l'échelle internationale des quantités et unités de rayonnement et de radioactivité. La Commission internationale de protection radiologique (CIPR) formule également les normes de définition et d'utilisation des diverses quantités et unités employées en radioprotection. Nous présentons dans ce qui suit une description de quelques-unes des quantités, unités et définitions d'utilisation courante dans ce domaine.

Activité : Cette quantité représente le nombre de transformations radioactives par unité de temps à partir d'un niveau d'énergie donné, selon la formule:

$$A = \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t}$$

A étant l'activité et d*N* le nombre probable de transformations radioactives spontanées à partir du niveau d'énergie donné dans l'intervalle de temps dτ. L'activité est liée au nombre *N* de noyaux radioactifs par la formule:

$$A = \lambda N$$

dans laquelle λ est la constante de désintégration. L'activité s'exprime en secondes inverses (s^{-1}), l'unité spécifique étant le becquerel (Bq).

Constante de désintégration (λ). Pour un radionucléide donné, la constante de désintégration (également dite *constante radioactive*) est la probabilité par unité de temps qu'une transformation radioactive se produise. La constante de désintégration s'exprime en secondes inverses (s^{-1}). Elle est liée à la période radioactive $t_{½}$ d'un radionucléide par la formule:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{½}} \approx \frac{0{,}693}{t_{½}}$$

La constante de désintégration λ est liée à la vie moyenne τ d'un radionucléide par la formule:

$$\lambda = \frac{1}{\tau}$$

L'activité *A(t)* et le nombre de noyaux radioactifs *N(t)* peuvent être exprimés en fonction du temps par les formules $A(0)e^{-\lambda t}$ et $N(0)e^{-\lambda t}$, respectivement.

Dose absorbée : C'est la quantité fondamentale de la dosimétrie des rayonnements ionisants. Il s'agit essentiellement de l'énergie que les rayonnements ionisants cèdent à la matière par unité de masse. La formule de la dose absorbée est la suivante:

$$D = \frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}m}$$

D étant la dose absorbée et dε l'énergie moyenne cédée à la matière de masse d*m*. La dose absorbée s'exprime en joules par kilogramme ($J\ kg^{-1}$), l'unité spécifique étant le gray (Gy).

Effet biologique déterministe :. C'est l'effet biologique des rayonnements ionisants dont la probabilité est nulle lorsque la dose absorbée est petite, mais passe très rapidement à l'unité (100%) au-delà d'un certain niveau de dose absorbée (seuil). L'induction d'une cataracte est un exemple d'effet biologique déterministe.

Effet biologique stochastique ou probabiliste : C'est un effet biologique des rayonnements ionisants, dont la probabilité augmente avec la dose absorbée, vraisemblablement sans qu'il existe un

seuil, mais dont la gravité est indépendante de cette dose. Le cancer est un exemple d'effet biologique stochastique.

Efficacité biologique relative (EBR) : L'EBR d'un rayonnement par rapport à un autre est le rapport inverse des doses absorbées produisant le même degré d'un résultat biologique défini.

Equivalent de dose :. L'équivalent de dose H_T est la dose absorbée en moyenne pour tout un tissu ou organe (par opposition à la dose absorbée en un point) et pondérée en fonction du facteur de qualité du rayonnement considéré. C'est une quantité relevant de la radioprotection, qu'il ne convient donc pas d'utiliser dans le cas des doses absorbées élevées reçues en un laps de temps relativement court. L'équivalent de dose est exprimé par la formule:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

$D_{T,R}$ étant la dose absorbée moyenne pour tout tissu ou organe T attribuable au rayonnement R, et w_R le facteur de pondération du rayonnement. L'équivalent de dose est exprimé en joules par kilogramme (J kg^{-1}), l'unité spécifique étant le sievert (Sv).

Equivalent de dose efficace . L'équivalent de dose efficace E est la somme des équivalents pondérés de dose dans tous les tissus ou organes du corps. C'est une quantité relevant de la radioprotection, qu'il ne convient donc pas d'utiliser dans le cas de doses absorbées élevées reçues en un laps de temps relativement court. Elle est exprimée par la formule:

$$E = \sum_T w_T H_T$$

w_T étant le facteur de pondération pour le tissu et H_T, l'équivalent de dose pour le tissu T. La dose efficace s'exprime en joules par kilogramme (J kg^{-1}), l'unité spécifique étant le sievert (Sv).

Facteur de pondération des rayonnements. Il s'agit d'un nombre w_R qui, pour un type donné et une énergie donnée d'un rayonnement R, est représentatif des valeurs de l'efficacité biologique relative avec laquelle ce rayonnement peut provoquer des effets stochastiques à faible dose. Les valeurs de w_R sont liées au transfert linéique d'énergie TLE ou TEL selon les publications. Elles sont indiquées dans le tableau suivant. La figure illustre la relation entre w_R et le TLE dans le cas des neutrons.

Facteurs de pondération des rayonnements w_R

Type de rayonnement et gamme d'énergie	w_R
Photons, toutes énergies	1
Electrons et muons, toutes énergies[2]	1
Neutrons, énergie <10 keV	5

10 keV à 100 keV	10
>100 keV à 2 MeV	20
>2 MeV à 20 MeV	10
>20 MeV	5
Protons (sauf protons de recul), énergie >2 MeV	5
Particules alpha, fragments de fission, noyaux lourds	20

Toutes les valeurs se rapportent au rayonnement incident sur le corps ou, dans le cas des sources internes, au rayonnement émis à partir de la source.[2] A l'exception des électrons Auger émis par des noyaux liés à l'ADN.

Facteur de pondération des tissus w_T. Nombre représentant la contribution du tissu ou de l'organe T au détriment total dû à l'ensemble des effets stochastiques résultant d'une irradiation uniforme de tout le corps. La raison d'être de ce facteur est que la probabilité des effets stochastiques dus à un équivalent de dose dépend du tissu ou de l'organe irradié. Un équivalent de dose uniforme appliqué à tout le corps devrait donner une dose efficace numériquement égale à la somme des doses efficaces pour tous les tissus et organes du corps. Par conséquent, la somme de tous les facteurs de pondération des tissus est normalisée à l'unité. Le tableau présente les facteurs de pondération pour différents tissus et organes.

Tableau : Facteurs de pondération des tissus w_T

Tissu ou organe	w_T
Gonades	0,20
Moelle osseuse (rouge)	0,12
Côlon	0,12
Poumon	0,12
Estomac	0,12
Vessie	0,05
Sein	0,05
Foie	0,05
Œsophage	0,05
Thyroïde	0,05
Peau	0,01
Surface des os	0,01
Autres tissus et organes	0,05

Ces valeurs ont été calculées pour une population de référence composée d'un nombre égal d'hommes et de femmes dans une large fourchette d'âge. Dans la définition de la dose efficace, les

valeurs s'appliquent aux travailleurs, à l'ensemble de la population et aux deux sexes. Pour fins de calcul, la catégorie «Autres tissus et organes» comprend ce qui suit: surrénales, cerveau, côlon ascendant supérieur, intestin grêle, reins, muscles, pancréas, rate, thymus et utérus. Cette liste inclut les organes qui peuvent être sélectivement irradiés. Certains de ces organes sont connus comme susceptibles d'induction de cancer.[3] Dans les cas exceptionnels où un seul des tissus ou organes de la catégorie «Autres tissus et organes» reçoit un équivalent de dose supérieur à la plus haute dose dans l'un quelconque des douze organes dont le facteur de pondération est défini, on lui attribuera un facteur de pondération de 0,025 et on attribuera un facteur de pondération de 0,025 à la dose moyenne des autres tissus et organes de cette même catégorie.

Période radioactive : La période radioactive (parfois appelée *demi-vie*) est le temps nécessaire pour que l'activité d'un radionucléide donné diminue de moitié. On peut également dire que la période radioactive est égale au temps nécessaire pour que le nombre de noyaux, dans un système radioactif donné, diminue de moitié. L'unité fondamentale est la seconde (s), mais la période est aussi couramment exprimée en heures, en jours et en années. Pour un radionucléide donné, la période $t_{1/2}$ est liée à la constante de désintégration λ par la formule:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0{,}693}{\lambda}$$

Transfert linéique d'énergie. C'est l'énergie qu'une particule chargée transmet à la matière qu'elle traverse par unité de longueur de la trajectoire suivie. Elle est exprimée par la formule:

$$L = \frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}l}$$

L étant le transfert linéique d'énergie et dε, l'énergie moyenne cédée par la particule après avoir franchi la distance d*l*. Le transfert linéique d'énergie (TLE ou TEL) s'exprime en joules par mètre (J m^{-1}).

Vie moyenne . La vie moyenne ou durée moyenne de vie est égale au temps moyen pendant lequel un état nucléaire peut survivre avant de subir une transformation qui l'amènera à un niveau d'énergie inférieur avec émission d'un rayonnement ionisant. L'unité fondamentale est la seconde (s), mais la vie moyenne est aussi couramment exprimée en heures, en jours et en années. Elle est liée à la constante de désintégration par la formule:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

τ étant la vie moyenne et λ, la constante de désintégration pour un nucléide donné à un niveau d'énergie donné.

Chapitre III : Les effets biologiques des rayonnements ionisants

III.1. Introduction

Après leur découverte par Röntgen en 1895, les rayons X ont été adoptés si rapidement dans le diagnostic et le traitement des maladies que les lésions dues à une exposition excessive ont presque immédiatement fait leur apparition chez les pionniers du domaine, qui n'étaient pas encore conscients des risques qu'ils encouraient (Brown, 1933). Au début, les lésions consistaient essentiellement en réactions cutanées sur les mains de ceux qui manipulaient les premiers appareils à rayons X. Une dizaine d'années plus tard, beaucoup d'autres lésions étaient signalées, y compris les premiers cancers attribués aux rayonnements (Stone, 1959).

Depuis ces premières constatations, l'étude des effets biologiques des rayonnements ionisants a constamment reçu des impulsions nouvelles du fait de leur utilisation croissante en médecine, en sciences et dans l'industrie, ainsi que dans les applications pacifiques et militaires de l'énergie nucléaire. C'est ce qui explique que les effets biologiques des rayonnements aient fait l'objet d'investigations beaucoup plus approfondies que ceux de tout autre agent extérieur. D'ailleurs, les connaissances radiobiologiques acquises ont beaucoup contribué aux actions entreprises pour protéger la santé humaine contre bien d'autres risques liés à l'environnement.

III.2. Les effets déterministes : sont les effets qui apparaissent a court et moyen termes.

2.1. Energie communiquée au milieu. Contrairement aux autres formes de rayonnement, les rayonnements ionisants peuvent transmettre suffisamment d'énergie localement pour éjecter des électrons des atomes sur lesquels ils agissent. Ainsi, à mesure que les particules ionisantes heurtent de façon aléatoire des atomes et des molécules en passant à travers des cellules vivantes, elles donnent naissance à des ions et à des radicaux libres qui rompent les liaisons chimiques et provoquent d'autres transformations moléculaires qui endommagent les cellules touchées. La répartition spatiale de l'ionisation dépend du facteur de pondération du rayonnement w_R.

2.2. Effets sur l'ADN . Le rayonnement peut altérer toute molécule de la cellule, mais l'ADN est la cible biologique la plus critique à cause de la redondance limitée de l'information génétique qu'il contient. Une dose absorbée assez importante pour tuer une cellule moyenne en voie de division — 2 grays (Gy) — suffit pour causer des centaines de lésions dans ses molécules d'ADN. La plupart de ces lésions sont réparables, mais celles qui résultent d'un rayonnement ionisant dense (proton ou particule alpha, par exemple) sont en général moins susceptibles de réparation que celles d'un rayonnement moins ionisant (rayons X ou gamma, par exemple). Par conséquent, les rayonnements à forte densité d'ionisation (c'est-à-dire à transfert linéique d'énergie (TLE) élevé) ont ordinairement une efficacité biologique relative (EBR) supérieure à celle des rayonnements à faible densité d'ionisation (à TLE peu élevé) pour la plupart des lésions.

2.3. Effets sur les gènes. Les dommages non réparables ou mal réparés subis par l'ADN peuvent donner lieu à des mutations dont la fréquence semble croître de façon linéaire avec la dose, à environ 10^{-5} à 10^{-6} par locus et par Gy, sans qu'il existe apparemment de seuil. Pour certains

experts, cette proportionnalité apparente entre le taux de mutation et la dose signifierait que le passage d'une seule particule ionisante à travers l'ADN suffit en principe pour causer une mutation (BEIR V, 1990). Chez les victimes de la catastrophe de Tchernobyl, la relation dose-effet observée pour les mutations de la glycophorine dans les cellules de moelle osseuse ressemble étroitement à celle que l'on a mise en évidence chez les survivants des bombardements atomiques.

2.4. Effets sur les chromosomes. Les dommages causés par les rayonnements ionisants aux matériaux génétiques peuvent également provoquer des modifications du nombre et de la structure des chromosomes, dont on a observé que la fréquence augmentait avec la dose chez les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants, les survivants des bombardements atomiques et d'autres personnes également exposées. La relation dose-effet correspondant aux aberrations chromosomiques des lymphocytes sanguins humains a été suffisamment bien caractérisée pour constituer un moyen utile de dosimétrie biologique.

2.5. Effets sur la survie des cellules. L'inhibition de la division cellulaire compte parmi les premiers effets observés de l'irradiation. Elle se manifeste rapidement après l'exposition et varie avec la dose tant dans son degré que par sa durée. Même si l'inhibition de la mitose est le plus souvent transitoire, les dommages que les rayonnements ionisants font subir aux gènes et aux chromosomes peuvent tuer les cellules en cours de division, qui représentent une classe très radiosensible. Mesurée en fonction de la capacité de prolifération, la survie des cellules en cours de division tend à décroître de façon exponentielle avec l'augmentation de la dose, 1 à 2 Gy suffisant en général pour réduire de moitié le nombre de cellules survivantes.

2.6. Effets sur les tissus. Les cellules matures qui ne sont pas en cours de division sont relativement radiorésistantes, contrairement aux cellules en cours de division, qui sont radiosensibles et peuvent être détruites en nombre suffisant pour causer une atrophie du tissu. La vitesse de ce processus dépend de la dynamique de la population cellulaire dans le tissu en cause. Autrement dit, il est en général beaucoup plus lent dans les organes à régénération cellulaire lente, comme le foie et l'endothélium vasculaire, que dans les organes à régénération cellulaire rapide, comme la moelle osseuse, l'épiderme et la muqueuse intestinale. Il convient de noter en outre que si le volume de tissu irradié est assez petit ou que la dose est accumulée d'une manière assez progressive, la prolifération compensatoire des cellules survivantes peut considérablement réduire la gravité de la lésion.

III.3. Les effets Stochastiques : sont les effets qui peuvent apparaître à long terme. On peut trouver les effets cancérogènes et les effets héréditaires.

3.1. Effets cancérogènes

La cancérogénicité des rayonnements ionisants, notée dès le début du siècle à cause de la fréquence du cancer de la peau et de la leucémie chez les pionniers de l'étude des radiations, a été largement démontrée depuis par l'existence d'une relation entre la dose et les excès de néoplasmes tous types confondus chez les travailleurs ayant manipulé des peintures luminescentes au radium, les mineurs en roche dure travaillant sous terre, les survivants des bombardements atomiques, les malades soumis à des traitements de radiothérapie et les animaux de laboratoire irradiés à titre expérimental (Upton, 1986; BEIR V, 1990).

Les tumeurs bénignes et malignes induites par irradiation mettent le plus souvent des années sinon des décennies à se développer et ne se distinguent en rien des tumeurs attribuables à d'autres causes. De plus, à peu d'exceptions près, il n'a été possible de les déceler qu'après l'application d'équivalents de dose relativement importants (0,5 Sv) et leur développement variait avec le type de néoplasme ainsi qu'avec l'âge et le sexe des personnes exposées.

Relation dose-effet. Parmi les différents modèles dose-effet utilisés pour estimer les risques d'une irradiation de faible niveau, celui qui a été jugé le mieux ajusté aux données existantes a la formule suivante:

$$R(D) = R_0[1 + f(D) \cdot g(b)]$$

où $R0$ représente le risque naturel, selon l'âge, de mourir d'un type donné de cancer; D, la dose reçue; $f(D)$, une fonction de la dose qui est linéaire quadratique dans le cas de la leucémie et linéaire pour les autres types de cancers; et $g(b)$, une fonction de risque dépendant d'autres paramètres tels que le sexe, l'âge au moment de l'exposition et le temps écoulé depuis celle-ci.

De tels modèles sans seuil ont été appliqués aux données épidémiologiques des survivants de Nagasaki et d'Hiroshima et d'autres populations irradiées pour calculer le risque d'apparition de différentes formes de cancers radio-induits). Il faut cependant interpréter ces estimations avec prudence si l'on cherche à prédire le risque de cancer attribuable à de faibles doses ou à des doses accumulées pendant des semaines, des mois ou des années, parce que les expériences effectuées sur des animaux de laboratoire ont établi que le pouvoir cancérogène des rayons X et gamma peut diminuer d'un ordre de grandeur lorsque l'exposition est répartie sur une longue période. En fait, comme d'autres sources l'expliquent, les données disponibles n'excluent pas la possibilité de l'existence d'un seuil d'équivalent de dose de l'ordre du millisievert (mSv), en deçà duquel le pouvoir cancérogène d'un rayonnement serait nul.

3.2. Les effets héréditaires

Quoique bien documentés pour d'autres organismes vivants, les effets héréditaires de l'irradiation n'ont jamais été observés chez les humains. Ainsi, une étude intensive de plus de 76 000 enfants de survivants japonais des bombardements atomiques, qui s'est étendue sur une quarantaine d'années, n'a révélé aucun effet héréditaire des rayonnements ionisants sur cette population, tels que grossesses à issue défavorable, décès chez les nouveau-nés, tumeurs malignes, translocations chromosomiques équilibrées, aneuploïdie des chromosomes sexuels, altérations des phénotypes de protéines sériques ou érythrocytaires, ou troubles de la croissance et du développement. Par conséquent, l'estimation des risques d'effets héréditaires des rayonnements dépend dans une grande mesure de l'extrapolation des conclusions tirées de l'observation de souris et d'autres animaux de laboratoire.

D'après les données expérimentales et épidémiologiques disponibles, on a déduit que la dose nécessaire pour doubler le taux de mutations héréditaires dans les cellules reproductrices humaines est d'au moins 1,0 Sv. On estime, sur cette base, que moins de 1% de l'ensemble des maladies humaines d'origine génétique sont attribuables au rayonnement naturel.

3.3. Les effets de l'irradiation prénatale

La radiosensibilité est assez élevée pendant toute la vie prénatale, mais les effets d'une dose donnée varient considérablement avec la phase de développement de l'embryon ou du fœtus au moment de l'exposition. C'est avant l'implantation que l'embryon court les plus grands risques d'être tué par l'irradiation, tandis qu'il est plus susceptible de subir des malformations et d'autres troubles du développement durant les phases critiques de l'organogenèse. Ce dernier fait est illustré par l'augmentation, liée à la dose, de la fréquence des déficiences mentales graves et par la baisse, également liée à la dose, des scores de quotient intellectuel des survivants des bombardements atomiques qui avaient été exposés entre huit et quinze semaines (et, dans une moindre mesure, entre seize et vingt-cinq semaines).

Résumé et conclusions

Les effets nocifs des rayonnements ionisants sur la santé humaine varient considérablement; ils vont de lésions évoluant vers un décès rapide à des effets non immédiats tels que cancers, malformations congénitales et troubles héréditaires qui pourront apparaître des mois, des années, voire des décennies plus tard. La nature, la fréquence et la gravité de ces effets dépendent de la qualité du rayonnement en cause ainsi que de la dose et des conditions d'exposition. La plupart de ces effets apparaissent après une irradiation d'un niveau assez élevé et ne se manifestent donc que chez des victimes d'accidents, des malades ayant subi des traitements de radiothérapie et d'autres personnes fortement irradiées. Par contre, on considère que la fréquence des effets géno-toxiques et cancérogènes des rayonnements ionisants augmente en proportion directe de la dose sans qu'il semble exister de seuil. Par conséquent, même si l'on ne peut pas totalement exclure la possibilité qu'un tel seuil existe, on part de l'hypothèse que la fréquence des effets croît avec la dose pour tous les niveaux d'exposition. Pour la plupart des effets des rayonnements, la sensibilité des cellules exposées varie en fonction directe de leur taux de prolifération et en fonction inverse de leur degré de différenciation, l'embryon et les enfants en cours de développement étant particulièrement vulnérables.